

钢结构模块单元式轻型楼盖振动特性及舒适度分析

余玉洁¹, 郑嘉兴¹, 王霄翔², 聂熙哲^{1*}, 高耀³

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 2. 湖南建工集团有限公司, 长沙 410008;

3. 中铁建工集团第五建设有限公司, 广州 511493)

摘要: 轻型模块化建筑楼盖因柔度大、质量轻等特性, 易产生人致振动舒适度问题。文中基于两种构造形式的模块化建筑楼盖实测数据, 结合有限元模拟方法, 深入研究骨架构造、泡沫混凝土填充及覆面层构造等因素对楼盖频率与振动加速度的影响规律, 分析各因素的作用机理和相互影响关系, 并提出提升楼盖振动性能的合理建议。结果表明: 轻型楼盖的振动性能受其骨架构造和面层构造的共同作用; 楼盖构造参数的变化主要通过改变楼盖质量和刚度, 对自振频率和人致振动响应产生影响。在仅角部支撑的边界条件下, 提升边梁刚度有助于改善轻型楼盖的振动控制效果; 面层增厚及泡沫混凝土填充会增大楼盖质量, 进而降低楼盖频率。轻型楼盖人致振动响应的主要影响因素为面层板厚度和泡沫混凝土填充; 增大边梁抗弯刚度和抗扭刚度, 对未填充泡沫混凝土的轻型楼盖振动控制具有一定作用。人致振动控制可优先采用长跨边梁跨中增设立柱支撑、楼盖骨架内填泡沫混凝土的措施, 其次可增大面层厚度或面板刚度, 采用箱形边梁也能部分改善楼盖的振动舒适度。

关键词: 轻型模块化楼盖; 人致振动舒适度; 自振频率; 峰值加速度; 均方根加速度; 有限元分析

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)03-0093-11

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20250529001

Vibration Characteristics and Human Comfort Analysis of Lightweight Steel Modular Unit Floors

YU Yujie¹, ZHENG Jiaying¹, WANG Xiaoxiang², NIE Xizhe^{1*}, GAO Yao³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Hunan Construction

Engineering Group Co., Ltd., Changsha 410008, China; 3. China Railway Construction Engineering

Fifth Construction Co., Ltd., Guangzhou 511493, China)

*Corresponding author: xizhenie@163.com

Abstract: Lightweight modular floors often suffer from human-induced vibration comfort issues due to their high flexibility and light weight. Based on the measured data of two types of modular floors and combined with finite element methods, the influencing factors such as framework configuration, foam concrete infill and cover layer configuration on the frequency and vibration acceleration of the floor system are investigated. The mechanism of these factors and their interaction are analyzed, and reasonable suggestions for enhancing the vibration performance of the floor system are provided. The results show that the vibration performance of lightweight floors is collectively affected by their framework configuration and cover layer configuration. Under corner-only support boundary conditions the increase of

收稿日期: 2025-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(52278231), 湖南省科技创新计划(2023RC3038, 2022RC1185), 湖南省自然科学基金(2023JJ40270)

作者简介:

余玉洁(1990—), 女, 博士, 教授, 主要从事装配式钢结构方面的研究。E-mail: yujiesu@csu.edu.cn。

通信作者:

聂熙哲(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事模块化钢结构建筑方面的研究。E-mail: xizhenie@163.com。

edge beam stiffness has a certain positive effect on vibration control of lightweight floors. Thickening the cover layer and filling with foam concrete will increase the mass of the floors, thus reducing its frequency and vibration response. The thickness of cover layer and foam concrete infill are the main factors of human-induced vibration response in lightweight floors. Increasing the flexural and torsional stiffness of edge beams has a certain effect on the vibration control of lightweight floors without foam concrete infill. For human-induced vibration control, priority can be given to adding column supports at the mid-span of long-span beams and filling foam concrete in the floor framework. Secondly, increasing the thickness or stiffness of the facing layer can be considered. The box-shaped edge beams can partially improve the floor performance.

Keywords: lightweight modular floor; human-induced performance; natural frequency; peak acceleration; root mean square acceleration; finite element analysis

模块化建筑凭借施工周期短、环境污染小、工业化程度高等优势,近年来受到广泛关注^[1-2]。根据单元材料的不同,模块化建筑可分为钢模块、混凝土模块和钢-混凝土组合式模块结构,其中钢模块建筑的生产施工工业化程度较高,能灵活适配模块化建筑单元生产、转运和吊装的各环节要求。钢模块单元设计中,常采用轻质高强度材料或构造以降低运输及吊装难度,单元楼盖一般选用轻型钢结构组合楼盖系统。

国内外学者已针对模块单元式轻型楼盖的设计及承载变形性能开展了大量研究。LAWSON等^[3]在英国钢模块建筑设计指南中明确了轻型楼盖钢骨架的构造要求; YANG等^[4]提出空腹桁架支承式楼盖,并分析其在自重和地震作用力下的承载和变形特征; CHEN等^[5]提出了内设泡沫芯的轻型楼盖,且对其刚度性能展开研究; LOSS等^[6]设计了钢木组合楼盖,同时给出其应用于模块化结构时的建造方式。BOADI-DANQUAH等^[7]提出了一种轻型钢网格上覆预制混凝土板的组合楼盖构造; LI等^[8]结合新加坡模块化建筑实践,提出了钢框架支承刚性混凝土板的楼盖构造; 王莉萍等^[9]针对冷弯薄壁骨架组合楼盖开展了抗弯刚度试验研究,分析构造参数对其性能的影响规律。但现有研究多聚焦于楼盖的构造要求、强度、刚度等力学性能,对其振动舒适度的研究相对不足。

在钢模块结构应用中,即便楼盖的强度、挠度等指标均满足规范要求,仍常出现振动感过强的问题,舒适度性能难以达到使用需求。为此,本文基于实际模块工程的轻型楼盖系统,开展振动频率和人致振动响应分析,研究结构骨架、填充混凝土、面层构造等参数对楼盖自振频率和舒适度性能的影响规律,并提出楼盖优化设计建议。

1 轻型钢模块楼盖数值分析及验证

1.1 钢模块单元楼盖振动性能试验概况

1.1.1 楼盖试件类型及构造

轻钢模块单元楼盖通常以轻钢龙骨作为主受力骨架,龙骨上铺设水泥纤维板及饰面层,通过自攻螺钉组合连接;为增强楼盖整体刚度,龙骨区域常填充泡沫混

土。王莉萍等^[9]曾针对某钢模块公寓的两种轻型楼盖,开展了静载刚度、自振频率及人致振动响应测试,共设置了3种构造工况。图1a)为冷弯薄壁异型钢骨架楼盖(L型),边梁采用3 mm厚Q345冷弯薄壁异型钢开口构件,檩条为2 mm厚非对称C形截面构件,间隔610 mm设置,楼盖骨架上铺设18 mm厚水泥纤维板,对该楼盖完成自振频率及人致振动响应测试。

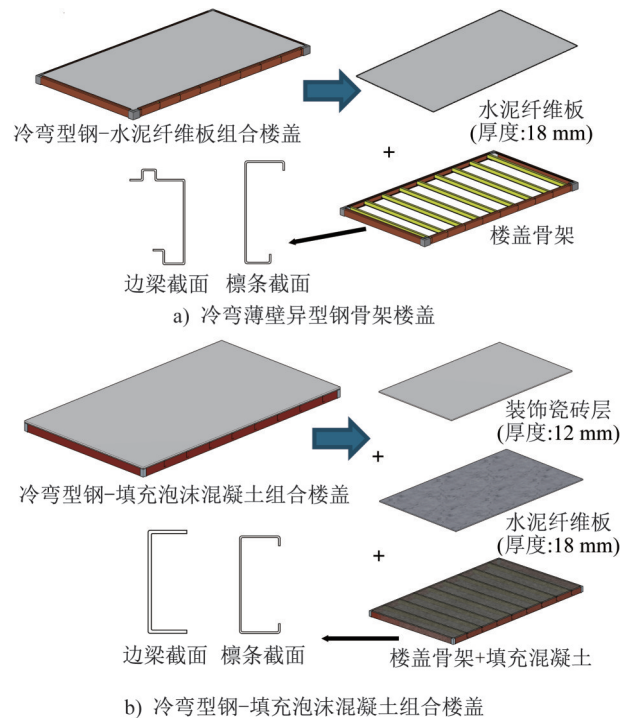


图1 轻型模块化楼盖系统结构

Fig. 1 Structure of lightweight modular floor system

图1b)为冷弯型钢-填充泡沫混凝土组合楼盖(S型),该楼盖边梁采用16a槽钢,檩条为2 mm壁厚的C形对称截面,楼盖骨架内填充140 mm厚泡沫混凝土以提升整体性,骨架上覆18 mm厚水泥纤维板,且在其表面贴敷12 mm厚瓷砖面层;实测分别在仅安装纤维板面层(S1型楼盖)和贴敷瓷砖面层(S2型楼盖)下,开展自振频率

及人致振动响应测试,楼盖具体截面构造及各部件尺寸如图1所示。L型和S型楼盖的水泥纤维板,分别通过间隔140 mm和200 mm的自攻螺钉与边梁、檩条紧固。

1.1.2 楼盖结构材料性能

试验楼盖的主要部件包括边梁、檩条、泡沫混凝土、水泥纤维板和瓷砖面层。边梁均采用Q355B钢材,实测弹性模量为206 GPa;檩条采用Q235B钢材,实测弹性模量为210 GPa。

水泥纤维板和瓷砖层的材料性能参考厂家提供数据,其材料密度分别为 $1\ 200\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1\ 500\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,弹性模量分别为5 520 MPa和20 000 MPa,泊松比分别为0.20和0.25;泡沫混凝土的干密度为 $400\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,弹性模量为200 MPa。

1.1.3 楼盖自振频率及人致振动响应测试

试验^[9]中分别测试了楼盖的自振频率和人致振动响应。如图2a)所示,L型楼盖通过角件支承于辅助框架上开展动力测试,采用双人沿楼盖纵向2 Hz同频行走的方式施加人致振动;S型楼盖采用加强型边梁,将长跨边梁全范围支承于辅助框架并开展振动测试,采用双人沿楼盖横向2 Hz同频行走的方式施加人致振动(图2b))。自振频率测试中,通过单人在楼盖中心原地跳跃1次激发自然振动响应,并进行频谱分析;布置4个加速度传感器于楼盖跨中及代表性檩条所对应的的面层区域,测试楼盖不同区域的加速度响应。

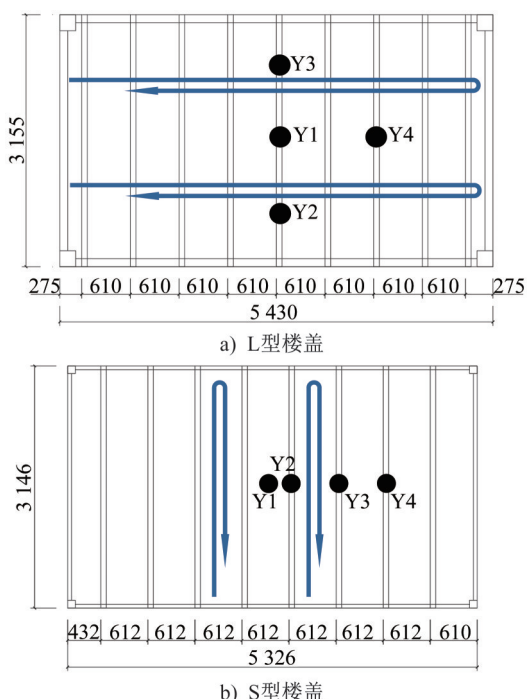


图2 现场试验与行走路线示意(单位:mm)

Fig. 2 Diagram of test and walking path(unit:mm)

1.2 钢模块轻型楼盖数值分析及模型建立

1.2.1 数值分析模型

采用ABAQUS建立楼盖结构数值分析模型,边梁、檩条、水泥纤维板和瓷砖层等均采用S4R壳单元模拟;檩条、边梁及角部连接盒间的焊缝连接均通过部件合并和共用节点的方式模拟;泡沫混凝土采用C3D8R实体单元模拟,其四周边缘与边梁内壁采用tie约束以模拟黏结效应,檩条应用Embedded嵌入方式模拟与泡沫混凝土层的组合效应。

水泥纤维板与檩条的自攻螺钉连接,采用节点-面绑定方式将螺钉位置的面板节点耦合至对应檩条或边梁翼缘;瓷砖层通过水泥砂浆贴敷于水泥纤维板表面,模型中采用tie约束模拟该连接关系。

楼盖振动过程中各部件均处于弹性状态,因此数值模型中各部件均按弹性材料考虑,弹性模量、泊松比、密度等参数依据实测或厂家提供数据设置;楼盖骨架、泡沫混凝土及面层板件的网格尺寸均为50 mm。结合试验测试的边界条件,L型楼盖仅约束角件底面,S型楼盖约束长跨边梁底面转角处的竖向位移,代表性楼盖模型及单元划分情况如图3所示。

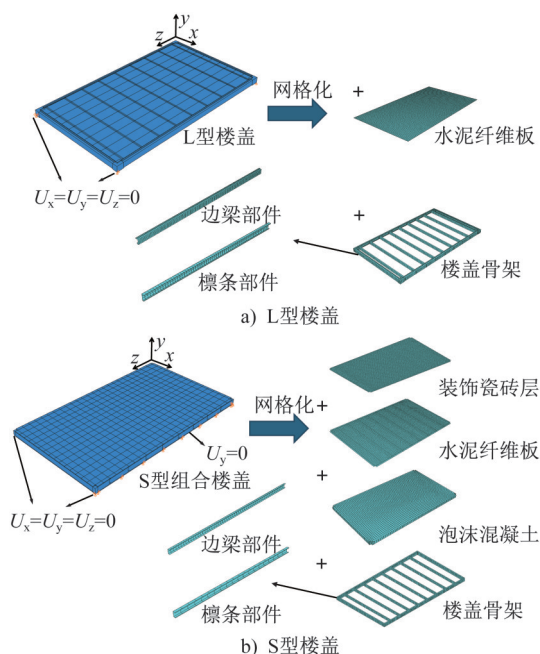


图3 代表性楼盖模型及网格划分情况

Fig. 3 Representative floor models and mesh generation details

1.2.2 自振频率及人致振动模拟方法

首先开展线性摄动频率分析,采用Lanczos法求解前10阶自振频率;人致振动分析通过ABAQUS内置的Dload子程序,实现作用位置随时间变化的移动荷载^[10]。考虑行人脚面宽度10 cm、长度42 cm,行人重量取0.7 kN,

荷载曲线与行走路线如图4所示;行人以2 Hz正常行走时,行走速度为 $1.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,从楼盖一端至另一端耗时约4 s。根据《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441—2019)^[11],单人行走荷载激励按式(1)计算:

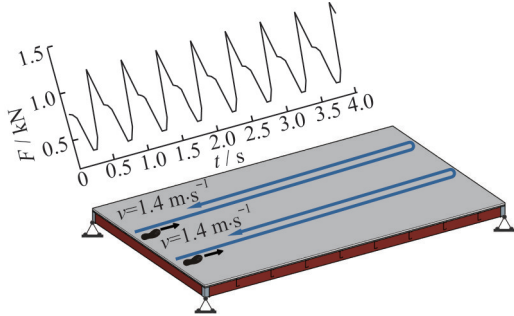


图4 荷载曲线与行走示意

Fig. 4 Diagram of load curve and walking

$$F(t) = P_p \left[1 + \sum_1^3 \gamma_i P_p \cos(2\pi i \bar{f}_1 t + \varphi_i) \right] \quad (1)$$

式中: $F(t)$ 为单人行走激励荷载; P_p 为行人重量,取 0.7 kN ; γ_i 为第 i 阶频率的动力因子,只考虑前三阶,分别取 $0.5, 0.2, 0.1$; \bar{f}_1 为第一阶的荷载频率,取 2 Hz ; t 为时间; φ_i 为第 i 阶频率对应的相位角,只考虑前三阶,分别取 $0, \pi/2, \pi/2$ 。

1.3 楼盖振动效应模拟结果验证

1.3.1 自振频率验证

表1对比了楼盖一阶自振频率的实测值与线性摄动

分析模拟值,S型楼盖的频率误差基本在1%以内;L型楼盖因边梁较薄、檩条与边梁连接搭接过多,测试频率误差为3.5%。整体而言,所建立的数值模型能有效预测轻型楼盖的自振频率。

表1 组合楼盖自振频率

Table 1 Natural frequency of composite floors

楼盖类型	实测值/Hz	模拟值/Hz	分析误差/%
L	7.32	7.58	3.5
S1	14.65	14.67	0.1
S2	16.60	16.72	0.7

1.3.2 人致振动响应验证

图5为3种楼盖中心Y1和Y4测点对应面板节点的竖向加速度模拟结果与实测数据对比(RMS为均方根加速度)。受动力响应随机性、人行激励控制偏差及测试偏差等因素影响,数值分析结果难以与动力时程实测数据完全匹配,因此同时提取1 s时段的均方根加速度曲线进行振动响应对比。结果显示,实测竖向加速度峰值略大于数值模拟结果,且离散性稍大;均方根加速度方面,数值模拟结果略高于实测数据。但整体上数值分析所得的振动响应趋势、振动幅度及加速度峰值水平与实测数据基本一致,验证了所建数值分析模型的可靠性。

L型楼盖整体骨架刚度较弱,自振频率偏低,在人行

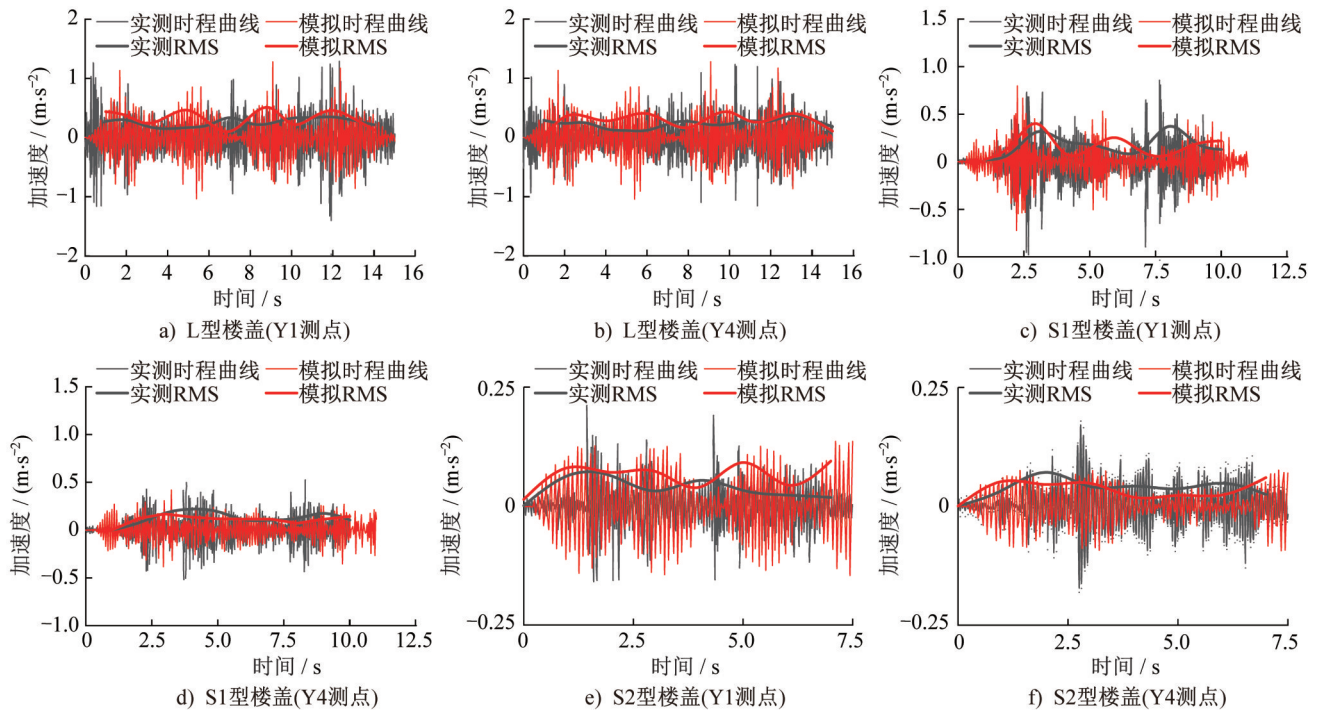


图5 组合楼盖振动响应验证

Fig. 5 Verification of composite floor vibration responses

激励下的振动响应显著,面板加速度响应的幅度和水平远高于S1和S2型楼盖;S型楼盖采用16a槽钢边梁及长跨支承边界,可显著提升楼盖刚度,使自振频率增大,人行激励下的振动响应水平降低;楼盖面层增加12 mm厚瓷砖层,主要提升了面层的抗弯刚度,虽使自振频率小幅提升,但能显著降低人行激励下的动力振动水平。

2 轻型钢模块楼盖振动影响规律分析

试验测试了轻型楼盖和组合楼盖两类试件,变化包括边梁截面形式及尺寸、混凝土填充、楼盖面层构造及材质,如表2所示。为系统分析上述参数对楼盖振动性能的影响规律,基于表2中边梁、檩条和面层构造,设计14

组典型楼盖构造方案并开展参数化数值分析。

楼盖骨架结构在图1中L型、S型基础上,增设SR型楼盖骨架:将S型骨架中16a槽钢边梁和檩条按等刚度原则替换为矩形钢管边梁,楼盖尺寸与S型楼盖保持一致。面层构造结合试验设置,分别考虑18 mm、30 mm厚水泥纤维板,以及18 mm厚水泥纤维板复合12 mm厚瓷砖层的构造(总厚度30 mm),分析覆面层厚度及刚度对自振频率和振动响应的影响;同时基于L、S型楼盖,考虑泡沫混凝土填充与否的情况,分析其对楼盖振动性能的影响,设计的楼盖类型如表3所示,各楼盖编号按“骨架类型+纤维板厚度+混凝土填充情况(C为有填充,N为无填充)+瓷砖层厚度”编号。

表2 楼盖骨架截面及抗弯刚度

Table 2 Section and flexural stiffness of floor framework

L型楼盖边梁及檩条构造		S型楼盖边梁及檩条构造		SR型楼盖边梁及檩条构造	
边梁截面/mm	檩条截面/mm	边梁截面/mm	檩条截面/mm	边梁截面/mm	檩条截面/mm
$I=4\ 863\ 746.1\ \text{mm}^4$	$I=1\ 109\ 203.5\ \text{mm}^4$	$I=6\ 318\ 001.6\ \text{mm}^4$	$I=1\ 312\ 398.7\ \text{mm}^4$	$I=6\ 264\ 808.0\ \text{mm}^4$	$I=1\ 322\ 205.0\ \text{mm}^4$

注: I 为截面绕水平轴的惯性矩。

表3 各楼盖构造

Table 3 Structure of floors

编号	楼盖类型	边梁	混凝土	覆面层构造
L18N(L)	L型	3 mm厚薄壁异形截面	无	18 mm厚纤维板
L30N			无	30 mm厚纤维板
L18N12			无	18 mm厚纤维板+12 mm厚瓷砖层
L18C			有	18 mm厚纤维板
L30C			有	30 mm厚纤维板
L18C12			有	18 mm厚纤维板+12 mm厚瓷砖层
S18N	S型	16a槽钢截面	无	18 mm厚纤维板
S30N			无	30 mm厚纤维板
S18N12			无	18 mm厚纤维板+12 mm厚瓷砖层
S18C(S1)			有	18 mm厚纤维板
S30C			有	30 mm厚纤维板
S18C12(S2)			有	18 mm厚纤维板+12 mm厚瓷砖层
SR30N	SR型	矩形截面	无	30 mm厚纤维板
SR30C	SR型	矩形截面	有	30 mm厚纤维板

试验中不同楼盖的边界支承条件及行走路线存在差异,导致实测频率及振动响应难以直接对比。结合钢模块结构的工程情况,楼盖主要支承于角部钢柱,因此参数化分析中统一楼盖边界为仅角件处支承(即图3a)边界约束模式);同时将人致振动激励统一为双人沿长跨方向以2 Hz同频往复行走,图6为两种类型楼盖测点布置与行走路线。

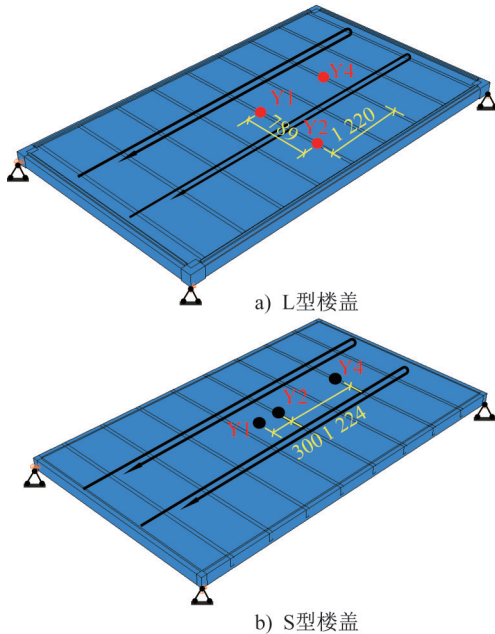


图6 两种类型楼盖测点布置与行走路线(单位:mm)
Fig. 6 Measuring points and walking route of two floors (unit:mm)

2.1 轻型钢模块楼盖自振频率结果分析

图7对比分析了L型楼盖、S型楼盖前两阶自振频率。在仅角部支承的条件下,L型和S型楼盖骨架的整体抗弯刚度均偏低,未填充泡沫混凝土时,楼盖自振频率均小于10 Hz。图7b)中S18C与S18C12工况分别对应实测楼盖S1与S2,仅边界条件由长跨梁全范围支承改为仅角部支承后,模拟所得自振频率由表1中14.65 Hz和16.6 Hz下降至6.21 Hz和6.85 Hz,说明仅角部支承时,长跨边梁的抗弯刚度是决定楼盖自振频率的关键因素。楼盖面层增厚及泡沫混凝土填充,一方面可增大楼盖整体抗弯刚度,提升自振频率;另一方面也会增加楼盖整体质量,降低自振频率,因此楼盖频率的变化是两种机制作用的综合结果。

当面层板厚度从18 mm增至30 mm时,L30N、S30N相较于L18N、S18N的一阶频率分别下降了12.5%和10.6%;而L30C、S30C相较于L18C、S18C的一阶频率仅下降了2.7%和1.4%,说明填充泡沫混凝土后,面层板增厚对自振频率的影响基本可忽略。填充混凝土虽能提升楼盖的整体抗弯刚度,但质量增大带来的影响更为显著,

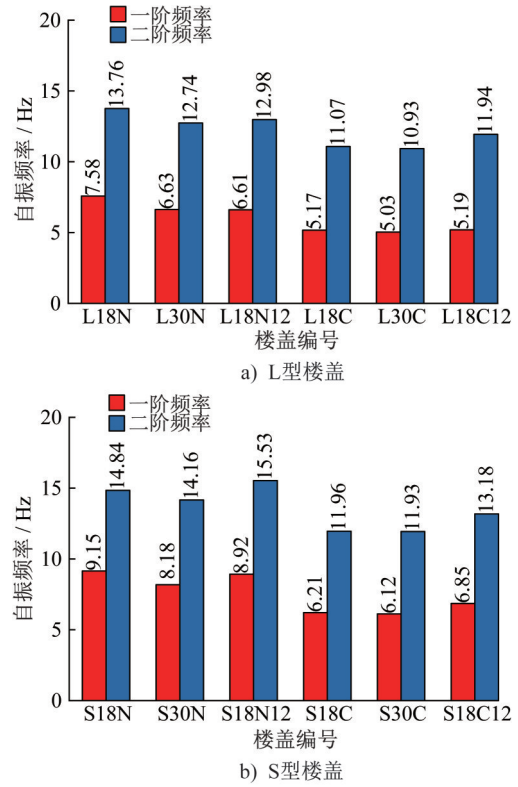


图7 自振频率对比

Fig. 7 Comparison of natural frequencies

因此填充混凝土的楼盖,其自振频率相较于同构造未填充混凝土楼盖的自振频率降低20%以上,且面层板构造变化对自振频率的影响占比减小。瓷砖层的弹性模量为水泥纤维板材的4倍,密度为水泥纤维板的1.25倍;当面层由30 mm厚纤维板改为18 mm厚纤维板复合12 mm厚瓷砖时,楼盖面层刚度进一步提升,整体刚度更大,因此铺设瓷砖层的L18C12、S18N12、S18C12楼盖,其自振频率较对应的L30C、S30N、S30C有小幅提升,且S型楼盖的提升幅度更明显。

图8对比了L型、S型和SR型楼盖骨架的自振频率,在相同面层构造条件下,SR型楼盖的一阶、二阶自振频率均高于S型楼盖的对应值:SR30N和SR30C的一阶频率较S30N和S30C分别提升了1.3%和3.7%,二阶频率分别提升了9.9%和7.8%,二阶频率的提升效果更为显著。

图9对比了3类代表性楼盖的自振模态。一阶模态均为角部支承下的整体上拱鼓曲,主要受楼盖整体刚度及自重影响;当楼盖刚度过小时,仅增大面层板刚度对自振频率的提升作用有限。S型楼盖的二阶自振模态为沿长边方向的反对称鼓曲变形,因此二阶频率均远高于一阶频率;楼盖一、二阶模态的形成主要源于长跨边梁刚度较低,在楼盖面板约束下,一阶表现为整体鼓曲,二阶因薄弱边梁上下弯曲导致楼盖呈反对称变形特征。二阶频率会随楼盖铺设瓷砖层有小幅提升;SR型楼盖边梁的抗

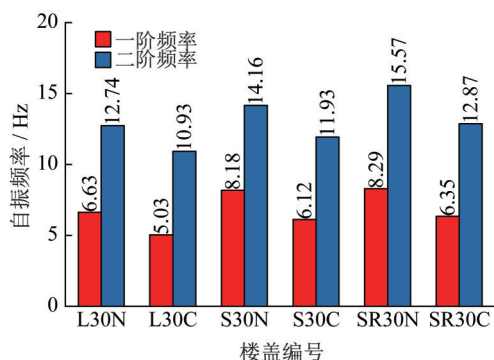


图8 L、S、SR型楼盖自振频率对比
Fig. 8 Comparison of natural frequencies in L, S and SR floor

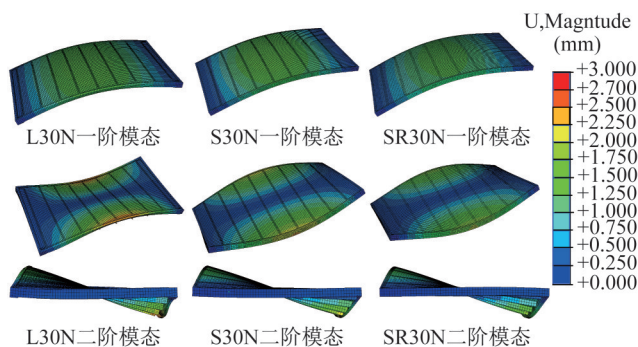


图9 典型楼盖自振模态(单位:mm)
Fig. 9 Natural vibration modes of typical floors (unit:mm)

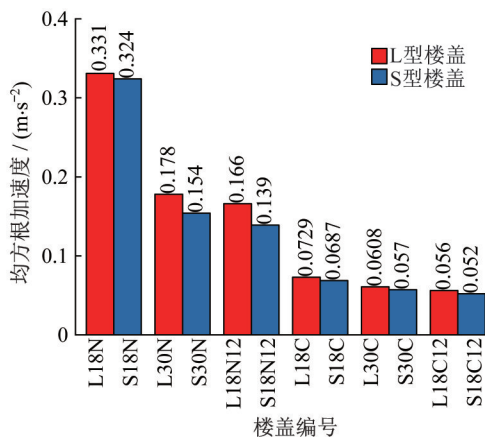
弯刚度与S型楼盖相近,但其闭口截面的抗扭能力更优,因此SR型楼盖的二阶频率提升较S型楼盖对应值提升效果更显著。

3 轻型钢模块楼盖人致振动响应分析

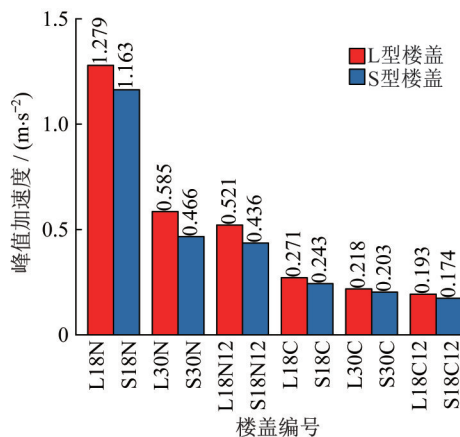
3.1 楼盖在不同面层结构下的振动响应

图10对比了L型、S型楼盖的均方根加速度和峰值加速度结果,两类楼盖中L18N和S18N的人致振动响应均较高。当楼盖面层由18mm厚纤维板改为30mm厚

纤维板时,L30N、S30N的均方根加速度相较于L18N和S18N分别降低了46.2%和52.4%,峰值加速度值分别降低了53.5%、59.9%,说明增大面层板厚度能有效降低楼盖的人致振动响应。L18N12、S18N12相较于L30N与S30N,其峰值和均方根加速度有进一步小幅下降,且峰值加速度的下降幅度更明显。L18C、S18C的均方根加速度相较于L18N、S18N下降了78.0%和78.8%,峰值加速度下降幅度分别为78.8%和79.1%,表明楼盖内填充泡沫混凝土对控制人致振动响应的作用更为显著。



a) 各类型楼盖均方根加速度对比



b) 各类型楼盖峰值加速度对比

图10 各类型楼盖振动加速度对比

Fig. 10 Comparison of vibration acceleration of various floors

填充泡沫混凝土后,进一步将楼盖面层厚度增至30mm,人致振动响应的下降幅度有所减弱,L30C、S30C相较于L18C、S18C的加速度响应下降约20%,说明填充泡沫混凝土时,增大面层刚度对人致振动响应的控制效果有限。整体而言,楼盖面层厚度和泡沫混凝土填充构造,均能有效控制人致振动响应。

图11为典型楼盖工况下Y1测点的加速度时程对比,未铺设瓷砖层且未填充混凝土时,L18N楼盖的加速度幅值波动较大,常出现异常高的峰值加速度,楼盖整体

振动不稳定,人致振动加速度响应的峰值点明显,且波动幅度变化大。将面层厚度增至30mm后,人致振动响应幅度显著下降,但高频振动响应的占比仍较高。L18N12因采用刚度更大的瓷砖面层,振动响应模式与L30N相近,峰值加速度响应略有下降,最大振动加速度幅值稳定在 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 左右。对于未填充泡沫混凝土的轻型楼盖系统,人行激励主要引发楼盖整体振动和面层板的局部振动;面层板增厚后,其抗弯刚度增大,高频高幅的振动响应随之减小。

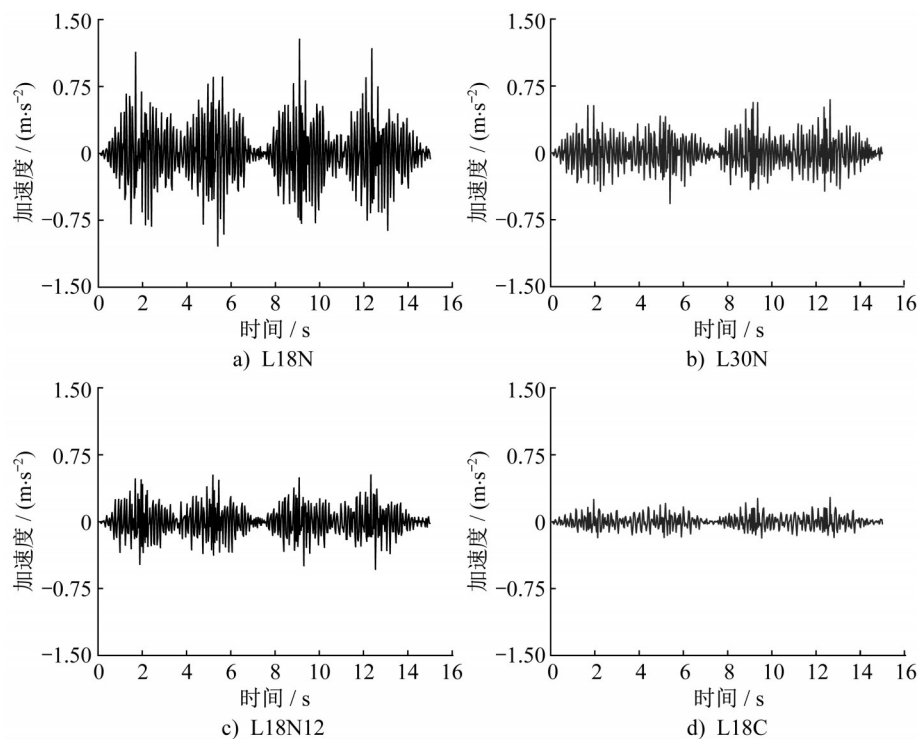


图 11 各典型楼盖加速度时程曲线

Fig. 11 Acceleration-time history curves of typical floor

L18C 楼盖的人致振动响应呈现低频低幅的模式,加速度峰值约为 $0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;填充混凝土后,轻型楼盖的自重增大,在行人行走冲量作用下的加速度响应幅度减小,同时自重增大导致楼盖自振频率下降,振动频率也随之降低。此外,泡沫混凝土对檩条和面层板的振动形成约束,使人致振动响应显著下降,且此时增大面层板厚度、改变面层构造对人对振动的控制效果,远弱于未填充泡沫混凝土楼盖对人对振动的控制效果。

3.2 楼盖在不同骨架结构下振动响应

图 12 为 L、S、SR 型楼盖在 30 mm 厚纤维板面层工况下的人致振动响应对比,相较于 L30N 楼盖, S30N 的峰值和均方根加速度分别下降了 20.3% 和 13.5%, SR30N 的加速度响应则分别下降了 39.3% 和 42.1%,说明增大边梁的抗弯和抗扭刚度,对未填充泡沫混凝土的轻型楼盖振动控制具有一定作用。填充泡沫混凝土后, S30C 相较于 L30C 的振动加速度仅有小幅下降,而 SR30C 相较于 L30C 的加速度响应下降超 20%,表明此时楼盖边梁抗弯刚度的作用有限,但抗扭刚度仍能对人对振动响应产生影响。

图 13 为 L30N、S30N、SR30N、S30C 楼盖跨中檩条处的加速度时程对比, S30N 相较于 L30N,其小幅高频的振动响应减少,局部过大的峰值跳动情况得到改善;将边梁由槽钢替换为抗弯刚度相近的闭口钢管后,楼盖的低幅高频和高幅高频振动响应进一步减少,人行振动加速度

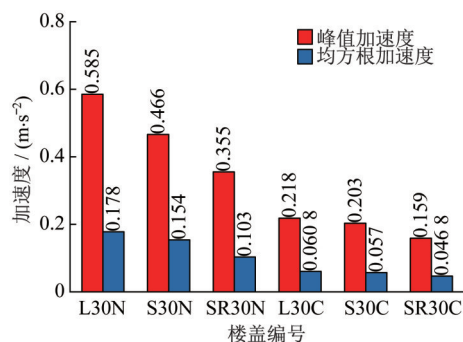


图 12 不同骨架楼盖加速度对比

Fig. 12 Comparison of acceleration in different floor framework

响应幅度显著下降。

整体来看,人行激励会同时引发楼盖整体振动和面层板的局部振动。未填充混凝土时,面板振动由檩条的约束程度和面板自身抗弯刚度决定,边梁抗弯刚度通过影响檩条的边界约束程度和楼盖整体刚度,间接对人对振动响应产生作用。填充泡沫混凝土后,檩条、边梁与混凝土形成一体化楼盖,檩条振动与楼盖整体振动趋于协同,因此 S30C 楼盖的振动响应幅度显著下降。L、S 型楼盖的边梁为开口截面,对檩条变形和振动的约束作用较弱;SR 型楼盖采用矩形闭口截面边梁时,抗扭刚度更强,对檩条的内凹和弯曲振动约束效应更显著,因此即便在填充泡沫混凝土的楼盖中,SR 型边梁仍能发挥一定的振动控制作用。

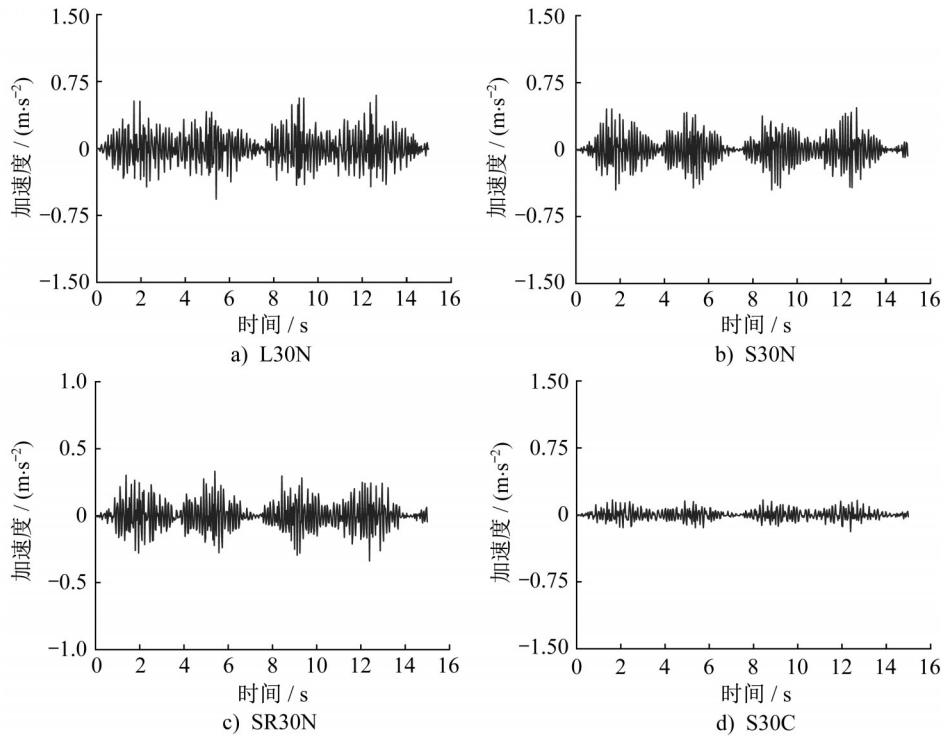


图 13 加速度时程曲线

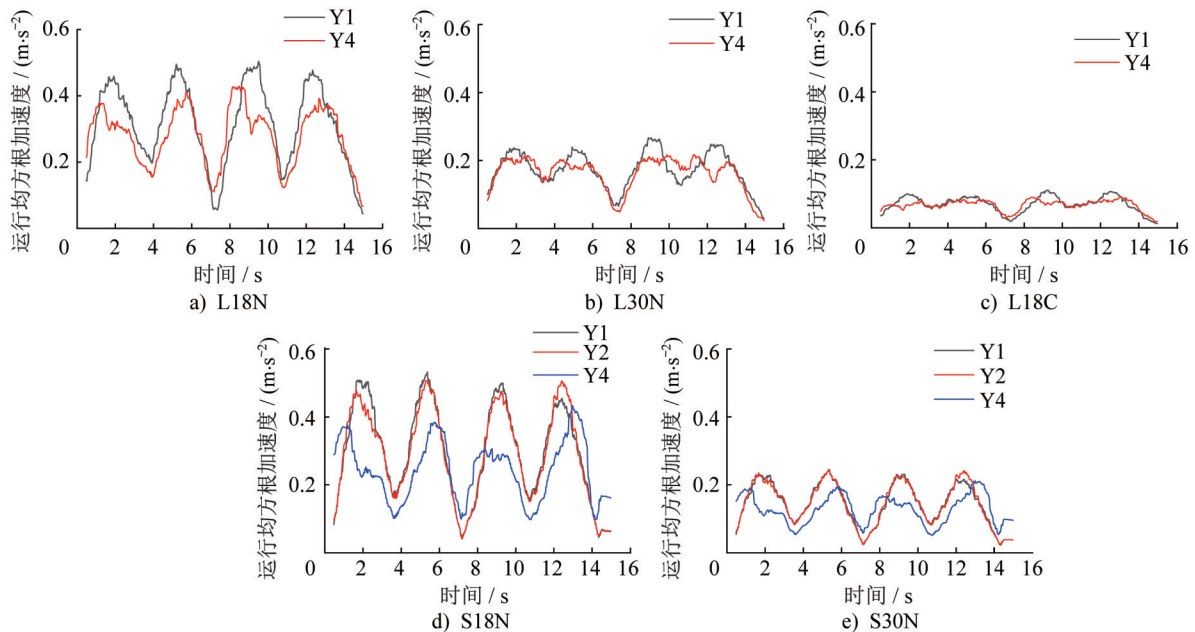
Fig. 13 Acceleration-time history curves

3.3 楼盖不同测点位置下振动响应

轻型楼盖系统的面层板仅通过自攻螺钉附着在檩条上,行人行走会诱发楼盖整体振动和面板的局部振动,其中面板局部振动响应与行人位置紧密相关,当行人靠近或远离测点时,测点处的加速度响应会呈现峰值和低谷的变化。

图 14 为 L、S 型楼盖典型测点的加速度响应对比,采用 1 s 时段内的均方根加速度(即运行均方根加速度)曲

线体现振动加速度的响应幅度和变化模式。L 型楼盖中, Y1 测点位于跨中檩条处, Y4 测点位于 1/4 跨檩条处,楼盖呈抛物线形上拱鼓曲, Y4 测点的变形幅度约为 Y1 测点的 0.75 倍; L18N 和 L30N 中 Y4 测点的加速度响应超过 Y1 测点的 0.8 倍, L18C 中 Y4 测点的振动响应与 Y1 测点接近,且在往复行走激励下, Y4 测点与 Y1 测点的相位差较小。



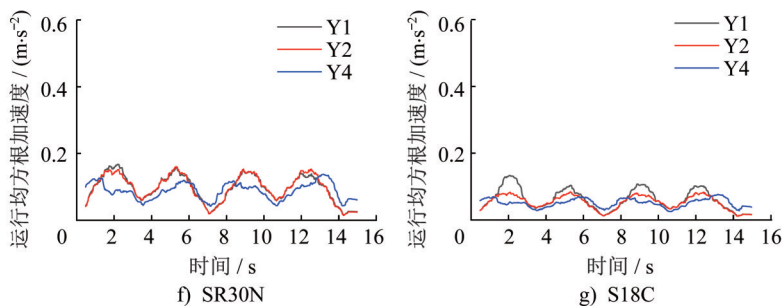


图14 L、S型楼盖中典型测点加速度响应对比

Fig. 14 Comparison of acceleration response of representative measuring points in L and S floor

S型楼盖中,Y1测点位于跨中面板处,Y2测点位于跨中附近檩条处,Y4测点位于1/4跨檩条处;S18N和S18C中Y1测点的振动响应略强于Y2测点的振动响应,采用30 mm水泥纤维板面层时,Y1测点和Y2测点的振动响应水平相近。S型楼盖中Y4测点在往复行走激励下,与Y1测点的相位差更为显著,且Y4测点的振动响应约为Y1测点的0.6~0.7倍。相较于L型楼盖,S型楼盖中Y1、Y2测点的振动幅度与之相近,但Y4测点的振动幅度更低。

整体而言,L型楼盖因边梁刚度较弱,在人行激励下,面板与骨架呈现协同振动模式,因此跨中和1/4跨测点的振动响应相位差较小;其振动消散能力偏低,振动峰值时的抖动效应更显著,即便行人远离后振动低谷段的加速度仍处于较高水平。S型和SR型楼盖因边梁刚度增大,楼盖中面板振动与骨架振动的非协同效应略有增强,面板随行人位置变化的局部振动效应更明显,因此Y1测点和Y4测点的相位差更为显著;同时受楼盖骨架边梁的嵌固作用,人致振动的消散能力略强,加速度响应随行人位置变化呈现出更清晰的峰谷变化。

图15为楼盖典型测点位置的加速度响应对比。L型楼盖中Y4测点的峰值加速度均小于Y1测点的峰值加速度,但均方根加速度峰值与Y1测点趋于一致,仅L18N中Y4测点的响应明显低于Y1测点的响应。S型楼盖中Y4测点的均方根加速度和峰值加速度响应均低于Y2测点的相应值,且S型楼盖中Y1测点和Y4测点的整体加速度响应略低于L型楼盖的对应值。但总体而言,控制楼盖人致振动效应最显著的措施,仍为增大面板厚度或刚度、在楼盖骨架内填充泡沫混凝土。

4 舒适度评估及振动性能改善方法

4.1 舒适度评估

根据《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441—2019)^[11]的规定,为保证楼盖结构具有良好的舒适度,其一阶竖向自振频率不应低于3 Hz。由图7和图8的分析结果可知,本次研究中所有楼盖的自振频率均大于

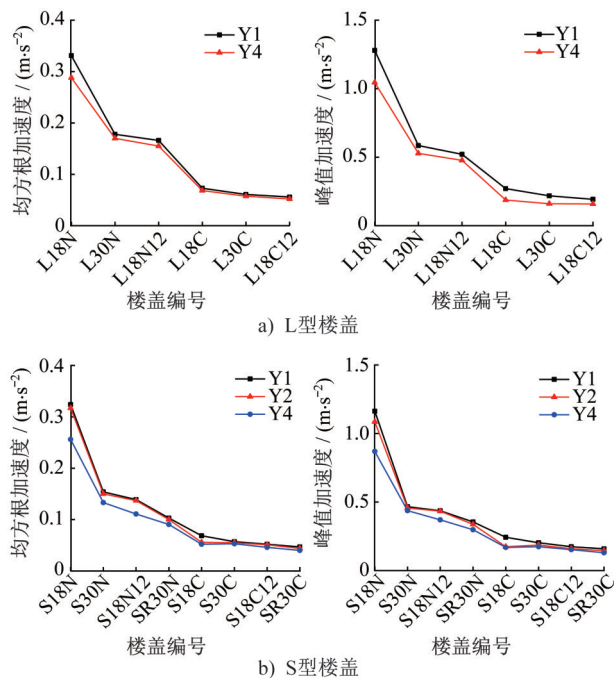


图15 楼盖不同测点下加速度响应

Fig. 15 Acceleration response of floor at different measuring points

3 Hz,满足规范对频率限值的要求。

ISO 10137-2017^[12]考虑了人体对不同振动频率的耐受程度,建议采用加权均方根加速度法进行舒适度评估,并给出了不同环境场景下的舒适度评价标准。本文选取各楼盖中振动响应最大的Y1测点,计算其均方根加速度,并与ISO标准中各场景舒适度限值进行对比(图16)。结果显示,在双人行走工况下,各组轻型钢模块楼盖的振动加速度响应较高,远超出住宅场景的舒适度限值,甚至高于车间场景的要求。

4.2 振动性能改善方法

楼盖长梁刚度不足是导致人致振动响应较大的主要原因,而轻型钢模块结构的长跨边通常为围护墙板,因此可在长梁跨中增设藏于隔墙内的中柱,以减小楼盖跨度。为验证该改善方案的效果,选取图16中振动响应较强的L30N和S30N楼盖,在其长梁跨中增加铰接支座约束,

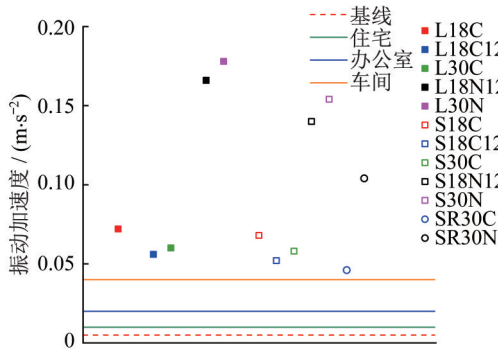


图 16 各组楼盖在 ISO 规范下振动加速度响应

Fig. 16 Root mean square acceleration response of each floor group under ISO standard

模拟附加中柱的支承效应(增强楼盖编号为 L30N-2 和 S30N-2),如图 17 所示,并采用相同的分析方法开展自振模态和人致振动模拟。

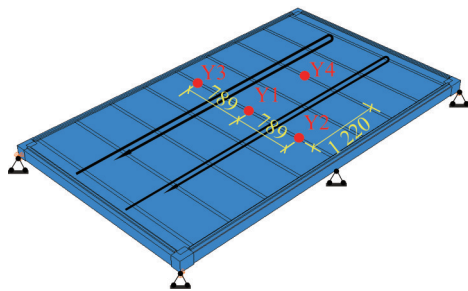


图 17 楼盖边界布置(单位:mm)

Fig. 17 Arrangement of floor boundary (unit:mm)

计算结果显示,L30N-2 和 S30N-2 的一阶频率分别为 14.9 Hz 和 17.2 Hz,相较于优化前的 L30N 和 S30N 有显著提升。图 18 中,长边跨中增设支承后,楼盖的自振频率由整体拱起或鼓曲转变为局部鼓曲和反对称鼓曲模态,此时楼盖振动由檩条结构决定。

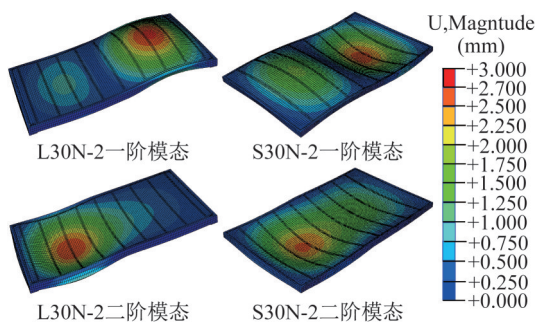


图 18 楼盖自振模态(单位:mm)

Fig. 18 Self-vibration modes of floors (unit:mm)

图 19 对比了增设支承前后楼盖各测点的均方根加速度,未设置跨中支承时,所分析的轻型楼盖在人致振动下的响应显著;而跨中增设支承后,楼盖振动响应显著降低,

均方根加速度在 0.005~0.009 m·s⁻² 范围内波动,已低于住宅场景 0.01 m·s⁻² 的加速度限值。综上所述,在长跨边梁跨中增设立柱支承,能有效改善轻钢楼盖的振动性能。

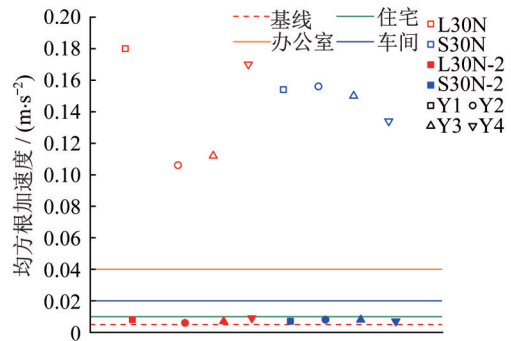


图 19 楼盖在 ISO 规范下均方根加速度

Fig. 19 Root mean square acceleration under ISO standard

5 结论

(1) 轻型模块化钢结构房屋的轻钢骨架上覆面板式楼盖,其自振频率和人致振动响应由楼盖骨架构造与面层构造参数共同控制。常用框架式钢模块结构的楼盖仅采用角部支承,楼盖整体刚度和自振频率偏低,而将楼盖长边方向直接支承可有效提升其自振频率。

(2) 仅角部支承的条件下,长跨边梁的抗弯刚度是决定楼盖自振频率的关键因素;楼盖面层增厚及泡沫混凝土填充,可增大楼盖整体抗弯刚度并提升自振频率,但同时会增加楼盖质量并降低楼盖自振频率。当楼盖整体刚度过小时,楼盖构造变化带来的质量变化影响更为显著,仅增大面层板刚度,对楼盖整体自振频率的提升作用较小。

(3) 轻型楼盖人致振动响应的主要影响因素为面层板厚度和泡沫混凝土填充;增大边梁的抗弯刚度和抗扭刚度,对未填充泡沫混凝土的轻型楼盖振动控制具有一定作用。填充泡沫混凝土后,楼盖结构对面板振动已形成较强的约束效应,此时边梁抗弯刚度的作用有限,但抗扭刚度仍能影响人致振动响应。

(4) 轻型钢模块楼盖难以仅通过约束自振频率来控制楼盖振动响应。人致振动控制的最有效措施为在长跨边梁跨中增设立柱支承、在楼盖骨架内填充泡沫混凝土,其次可增大面层厚度或面板刚度,采用箱形边梁也能部分改善楼盖的振动舒适度。

参考文献:

[1] CHEN Z H, LI H X, CHEN A Y, et al. Research on pretensioned modular frame test and simulations [J]. Engineering Structures, 2017, 151: 774-787. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.08.019.